

УДК 539.37

Исследование ползучести стали с карбидно-интерметаллидным упрочнением¹

А.М. Покровский

Экспериментально исследована ползучесть стали с карбидно-интерметаллидным упрочнением в широком температурном интервале. Предложены формулы, описывающие ползучесть стали в процессе термической обработки. Приведены экспериментальные кривые ползучести стали в аустенитном и мартенситном состояниях, а также теоретические кривые, рассчитанные по предлагаемым эмпирическим зависимостям.

Ключевые слова: испытательная машина, сталь с карбидно-интерметаллидным упрочнением, термообработка, структурные превращения, аустенит и мартенсит, кривая ползучести, напряжение, деформация.

The creep of steel with carbide-intermetallide strengthening has been experimentally investigated in a wide temperature range. The equations describing the steel creep in the process of thermal treatment are given. The experimental curves of steel creep in austenitic and martensitic states, as well as the theoretical curves calculated according to the proposed empirical dependencies are presented.

Keyword: testing machine, steel with carbide-intermetallic strengthening, heat treatment, structural transformations, austenite and martensite, creep curves, tension, deformation.

Как отмечалось в работе [1] высоколегированная сталь 25Н12М6К10 с карбидно-интерметаллидным упрочнением является перспективной для изготовления наплавки биметаллических прокатных валков повышенной стойкости. Основной упрочняющей технологической обработкой таких валков, в первую очередь определяющей их эксплуатационные свойства, является термическая обработка. В связи с тем, что термическая обработка валков производится при высоких температурах, достигающих 1000 °С, то в стали в полной мере проявляются реономные свойства. Поэтому для выбора рациональных режимов термообработки валков, который целесообразно проводить посредством математического моделирования температурно-структурного и напряженно-деформированного состояний [2], необходимо исследовать ползучесть стали и получить уравнения состояния, позволяющие описать это явление в широком температурном диапазоне, характерном для термической обработки прокатных валков. В связи с тем, что в интервале температур термической обработки



ПОКРОВСКИЙ
Алексей Михайлович
доктор технических наук,
профессор,
зам. зав. кафедрой
«Прикладная механика»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11–08–01314 а).

в стали протекают структурные превращения, необходимо исследовать ползучесть различных структур стали. Сталь 25Н12М6К10 относится к сталям мартенситного класса, в которых возможно существование двух структур — аустенита и мартенсита [1]. Ползучесть обеих этих структур была исследована в настоящей работе.

Испытания на ползучесть проводились на оборудовании лаборатории кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана [1]. Опыты при температуре выше 500 °С проводились в аргоне. Для испытания мартенситной структуры образцы нагревались до температуры испытания. Для испытания аустенитной структуры образец сначала нагревался со скоростью 20 °С/мин до температуры 1100 °С и выдерживался при данной температуре 10 мин для перехода стали в аустенитное состояние, а затем медленно охлаждался с печью до температуры эксперимента и выдерживался при этой температуре 5 мин для компенсации неравномерности охлаждения образца и захватов.

Исследование ползучести аустенита проводилось при температурах, характерных для термической обработки стали 350, 500, 650 и 800 °С. На рис. 1—3 представлены кривые ползучести для трех температур. Все сетки кривых ползучести получены для трех уровней напряжений, составляющих приблизительно 0,5; 0,7 и 1 от предела текучести аустенита для данной температуры [1].

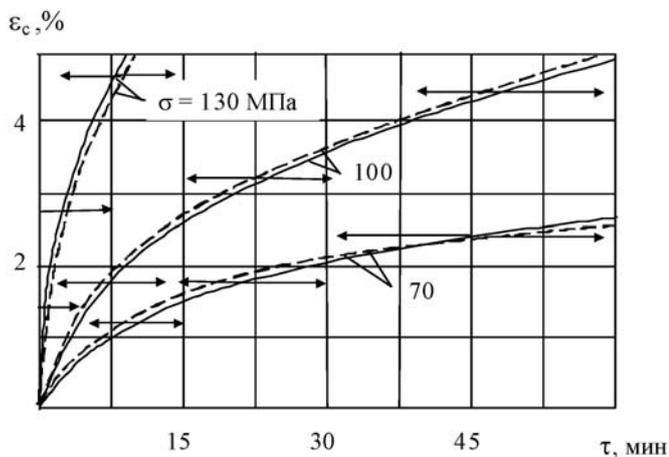


Рис. 1. Кривые ползучести аустенита при температуре 800 °С

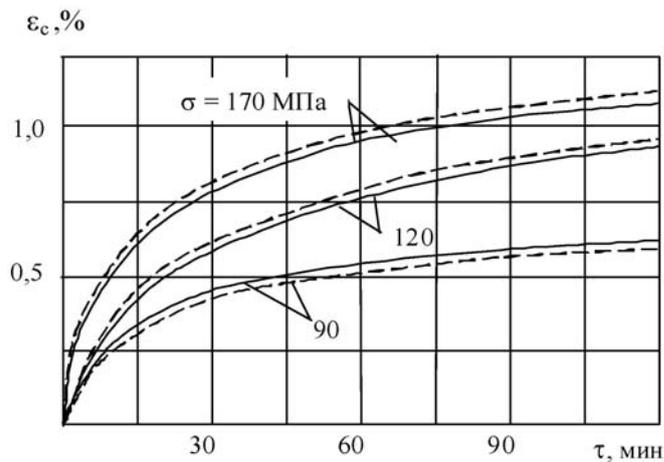


Рис. 2. Кривые ползучести аустенита при температуре 500 °С

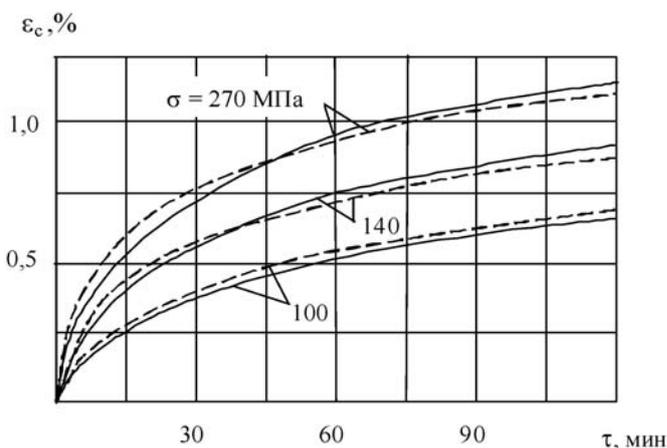


Рис. 3. Кривые ползучести аустенита при температуре 350 °С

Сплошные линии на рисунках соответствуют усредненным значениям трех опытов. Для кривых ползучести аустенита при 800 °С отмечены доверительные интервалы, рассчитанные по критерию Стьюдента [3] для доверительной вероятности 95 %. Как видно на рисунке, экспериментальные данные имеют допустимый разброс, и следовательно, проведение каждого опыта трижды гарантирует достоверность полученной информации.

Все приведенные на рис. 1—3 кривые ползучести имеют заметное упрочнение. Описание таких кривых наиболее удобно проводить по теории ползучести упрочнения при следующей зависимости между скоростью деформации ползучести, напряжением и деформацией ползучести [4]:

$$\xi_c = \gamma \sigma^v / \varepsilon_c^\beta, \quad (1)$$

где ξ_c — скорость деформации ползучести, $\xi_c = \frac{d\varepsilon_c}{d\tau}$; ε_c — деформация ползучести; σ — напряжение; γ, v, β — коэффициенты, зависящие от температуры.

Интегрирование уравнения (1) приводит к следующему уравнению кривой ползучести:

$$\varepsilon_c = [\gamma (\beta + 1)]^{\frac{1}{\beta+1}} \sigma^{\frac{v}{\beta+1}} \tau^{\frac{1}{\beta+1}}. \quad (2)$$

Коэффициенты γ, v, β для каждой из четырех сеток кривых ползучести аустенита определяли методом наименьших квадратов (МНК) так, чтобы сумма квадратов отклонений расчетных деформации ползучести от экспериментальных была минимальной. Рассматривалась сумма квадратов отклонений сразу для трех кривых сетки. При этом на каждой кривой ползучести выбирали 10 равноудаленных по времени точек. Значения полученных коэффициентов сведены в табл. 1. Теоретические кривые ползучести, рассчитанные по этим значениям, изображены на рис. 1—3 штриховыми линиями. Как видно, теоретические кривые хорошо описывают экспериментальные. Проведенный анализ показал, что коэффициент v можно считать постоянным и равным 1,3. Зависимости $\lg \gamma$ и β от температуры, представленные на рис. 4 и 5 соответственно, близки к линейным, и поэтому аппроксимировались, согласно МНК прямыми

$$\begin{aligned} \beta &= 1,73 - 6,67 \cdot 10^{-4} t; \\ \lg \gamma &= 6,71 \cdot 10^{-3} t - 14,9. \end{aligned} \quad (3)$$

Таблица 1

Параметры уравнения состояния при ползучести аустенита

Параметр	Температура, °C			
	800	650	500	350
$\gamma, (1/\text{МПа})^v/c$	$4,10 \cdot 10^{-10}$	$1,91 \cdot 10^{-11}$	$1,39 \cdot 10^{-12}$	$5,82 \cdot 10^{-13}$
v	1,30	1,30	1,30	1,30
β	1,21	1,29	1,40	1,52

Исследование ползучести мартенсита проводилось при температурах 200, 300, 400, 600, 700 и 800 °C. Причем при испытании мартенситной структуры в интервале температур

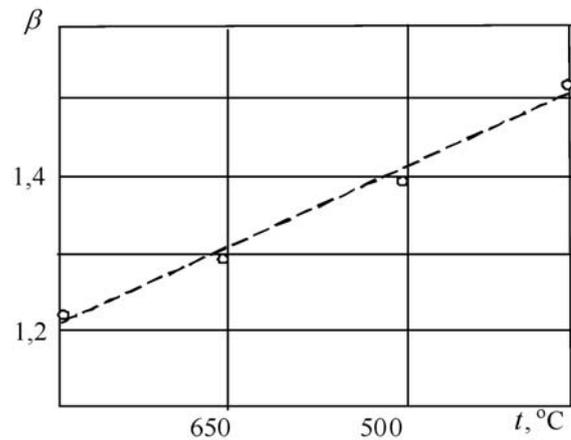


Рис. 4. Зависимость β от температуры для аустенита: \circ — эксперимент; - - - — аппроксимация

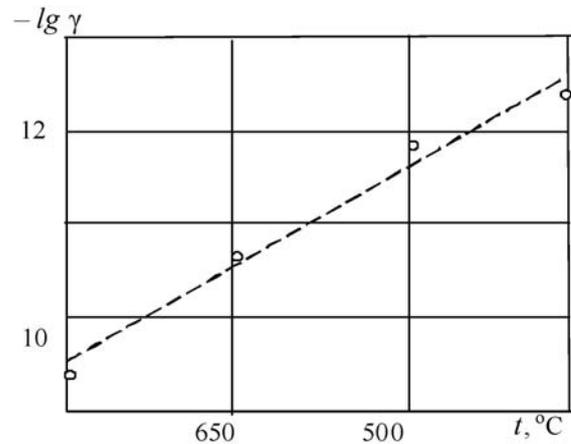


Рис. 5. Зависимость γ от температуры для аустенита: \circ — эксперимент; - - - — аппроксимация

570...820 °C происходит обратное мартенситное превращение и мартенсит превращается в аустенит. Поэтому при температурах 200, 300 и 400 °C получались кривые ползучести мартенсита, а при температурах 600, 700 и 800 °C — кривые ползучести гетерогенной структуры, состоящей из аустенита и мартенсита. На основании правила смеси для кривой ползучести гетерогенной структуры можно записать

$$\varepsilon_c(\tau) = \varepsilon_c^a(\tau) V_a + \varepsilon_c^m(\tau) V_m, \quad (4)$$

где $\varepsilon_c(\tau), \varepsilon_c^a(\tau), \varepsilon_c^m(\tau)$ — кривые ползучести гетерогенной структуры, аустенита и мартенсита соответственно.

Тогда кривую ползучести мартенсита можно пересчитать по кривым ползучести гетерогенной структуры и аустенита, вычислив предварительно удельные доли аустенита V_a и мартенсита V_m согласно кинетике обратного мартенситного превращения [1]:

$$\epsilon_c^m(\tau) = (\epsilon_c(\tau) - \epsilon_c^a(\tau)V_a) / V_a \quad (5)$$

На рис. 6—8 представлены кривые ползучести мартенсита для температур 800, 600 и 400 °С. Следует отметить, что предел текучести мартенсита значительно выше предела текучести аустенита при той же температуре [1]. Пробные экспериментальные исследования показали, что при выборе таких же соотношений между уровнями напряжений и пределом текучести (0,5; 0,7 и 1), как при испытании на ползучесть аустенита, разрушение гетерогенной структуры происходит очень быстро (меньше чем за 1 мин). Было установлено, что для получения кривых ползучести гетерогенной структуры в диапазоне около 2 ч при температуре испытаний от 600 до 800 °С уровни напряжений должны составлять около 0,1; 0,2 и 0,3 от предела текучести мартенсита, а при температурах от 200 до 400 °С — 0,3; 0,5 и 0,7. При таком выборе уровней напряжений можно было получить сетки кривых ползучести для времени 2 ч и деформаций ползучести, характерных для термообработки прокатных валков [2]. В тоже время уровни напряжений в опытах не превышали значений реальных термических напряжений [2], характерных для спрейерной закалки прокатных валков при данной температуре испытания.

Очевидно, что кривые ползучести мартенсита имеют заметное упрочнение, поэтому они, как и кривые ползучести аустенита были описаны по теории ползучести упрочнения (1), (2). Коэффициенты γ , ν , β для каждой из шести сеток кривых ползучести мартенсита определялись согласно МНК, также как для аустенита. Значения полученных коэффициентов сведены в табл. 2. Теоретические кривые ползучести, рассчитанные по этим значениям, изображены на рис. 6—8 штриховыми линиями.

Видно, что теоретические кривые ползучести мартенсита хорошо описывают экспериментальные. Проведенный анализ показал, что коэффициент ν можно считать постоянным и равным 1,8. Зависимости $\lg \gamma$ и β от температуры, также как для аустенита, близки к линейным, и поэтому аппроксимировались согласно МНК прямыми

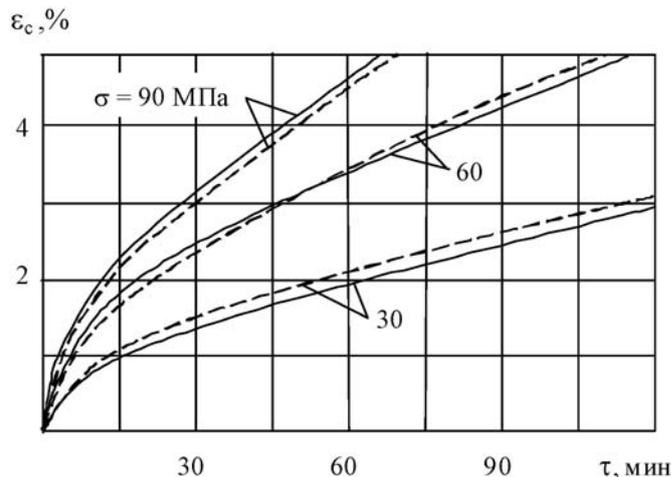


Рис. 6. Кривые ползучести мартенсита при температуре 800 °С

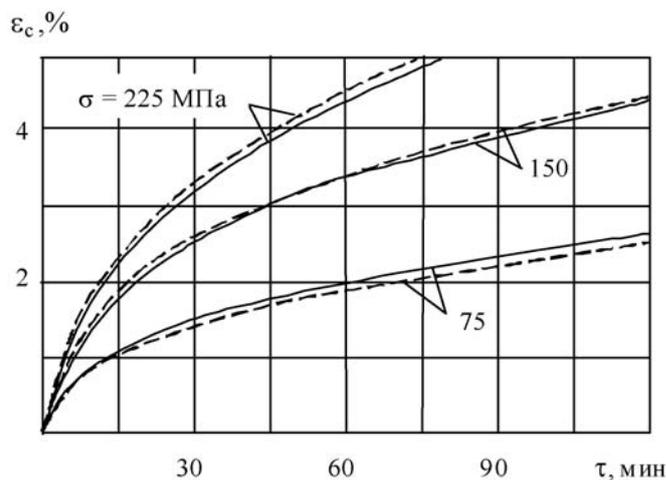


Рис. 7. Кривые ползучести мартенсита при температуре 600 °С

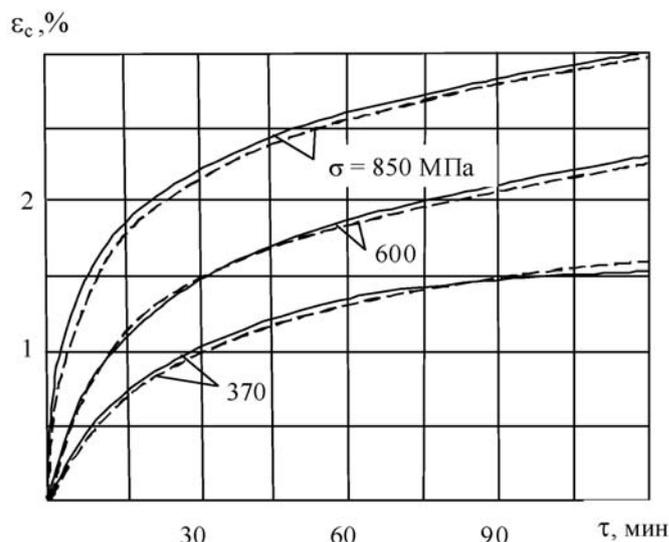


Рис. 8. Кривые ползучести мартенсита при температуре 400 °С

Таблица 2

Параметры уравнения состояния при ползучести мартенсита

Коэффициент	Температура, °С					
	800	700	600	400	300	200
γ , (1/МПа) ^{v/c}	$5,01 \cdot 10^{-10}$	$3,16 \cdot 10^{-11}$	$7,94 \cdot 10^{-12}$	$1,42 \cdot 10^{-14}$	$2,43 \cdot 10^{-15}$	$2,11 \cdot 10^{-17}$
ν	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
β	0,60	0,93	1,25	1,81	2,10	2,42

$$\beta = 3,02 - 3,04 \cdot 10^{-3} t ;$$

$$\lg \gamma = 1,23 \cdot 10^{-2} t - 18,7. \quad (6)$$

Проведенное исследование ползучести стали показало, что коэффициент ν можно считать постоянным как для аустенита, так и для мартенсита. Коэффициент упрочнения β уменьшается с увеличением температуры, что согласуется с известными исследованиями кратковременной ползучести при высоких температурах [5]. Изменение этого коэффициента у мартенсита больше, чем у аустенита. Коэффициент γ наоборот возрастает с увеличением температуры, причем изменение этого коэффициента также больше у мартенситной структуры, чем у аустенитной. Экспериментальные исследования показали, что большее изменение параметров уравнения состояния при ползучести у мартенсита объясняется тем фактом, что в интервале температур обратного мартенситного превращения (570...820 °С) ползучесть мартенситной структуры существенно возрастает.

Рассмотрим получение уравнения состояния при ползучести гетерогенной структуры. При использовании для описания ползучести гетерогенной структуры правила смеси (4) и использовании для скорости деформации ползучести аустенита и мартенсита соотношения (1) выражение для скорости деформации ползучести гетерогенной структуры при условии $V = \text{const}$ можно записать в следующем виде:

$$\xi_c = [\gamma_a \sigma^{\nu_a} / (\epsilon_c^a)^{\beta_a}] V_a +$$

$$+ [\gamma_M \sigma^{\nu_M} / (\epsilon_c^M)^{\beta_M}] V_M, \quad (7)$$

где $\gamma_a, \nu_a, \beta_a, \gamma_M, \nu_M, \beta_M$ — параметры уравнений состояния при ползучести аустенита и мартенсита соответственно.

Уравнение (7) при математическом моделировании позволяет учесть ползучесть стали в процессе формирования остаточных напряжений в прокатных валках с наплавкой из этой стали при термической обработке.

Выводы

1) кривые ползучести аустенита и мартенсита в интервале температур 200...800 °С имеют заметное упрочнение. Изменение эмпирических коэффициентов, описывающих ползучесть стали по теории упрочнения, у мартенсита больше, чем у аустенита;

2) аустенитная структура стали обладает большей ползучестью, чем мартенситная. Причем коэффициент ν , как для аустенита, так и для мартенсита можно считать постоянным, коэффициент упрочнения β , уменьшается по мере увеличения температуры, а коэффициент γ наоборот возрастает.

Литература

1. *Покровский А.М.* Исследование пластичности стали с карбидно-интерметаллидным упрочнением // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 10. С. 14—17.
2. *Вафин Р.К., Покровский А.М., Лешковцев В.Г.* Прочность термообработываемых прокатных валков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 264 с.
3. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
4. *Малинин Н.Н.* Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 222 с.
5. *Работнов Ю.Н., Милейко С.Т.* Кратковременная ползучесть. М.: Наука, 1970. 222 с.

Статья поступила в редакцию 03.11.2011 г.

Читателям!

В № 10 за 2011 г. в статье А.М. Покровского на с. 13 допущена опечатка.

Под фото автора вместо «зав. кафедрой» следует читать «зам. зав. кафедрой».

Редакция приносит свои извинения автору и читателям.